

Использование ГИС для оценки состояния наземных экосистем Норильского промышленного района

М. А. КОРЕЦ, В. А. РЫЖКОВА, И. В. ДАНИЛОВА

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: mik@ksc.krasn.ru*

АННОТАЦИЯ

На основе материалов наземных исследований на ключевых участках (2001–2004 гг.) в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района и данных дистанционного зондирования (1998–2004 гг.) выполнены оценка степени нарушенности растительного покрова с использованием мультиспектральной спутниковой съемки ENVISAT MERIS, анализ временной динамики состояния наземных экосистем с использованием разновременных спутниковых данных SPOT VEGETATION, пространственные регрессионные модели для аппроксимации превышений фоновых значений содержания тяжелых металлов и серы в различных компонентах наземных экосистем, балльная оценка степени нарушенности растительного покрова и уровней загрязнения территории, зонирование территории по степени нарушенности растительного покрова.

Ключевые слова: геоинформационные системы (ГИС), дистанционное зондирование (ДЗ), мультиспектральная спутниковая съемка, нарушенность наземных экосистем, тяжелые металлы и сера.

Для мониторинга состояния наземных экосистем на обширной территории в настоящее время оправдано использование данных спутниковой съемки среднего пространственного разрешения (100 м – 1 км в пикселе), обладающих широкой зоной захвата и достаточной периодичностью съемки. Данные со спутников, регистрируемые в узких спектральных каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов электромагнитных волн (оптический диапазон), успешно используются для оценки биохимических характеристик наземных экосистем, а также степени их нарушенности биотическими и абиотическими факторами [Curran et al., 1997].

Абсолютное и относительное содержание хлорофилла в фотосинтетически активных зеленых частях растений можно использовать как одну из основных характеристик их со-

стояния или степени деградации. Концентрация хлорофилла может быть оценена по положению красной границы зоны поглощения хлорофилла [Clevers et al., 2002]. При этом большей концентрации хлорофилла соответствует смещение границы в сторону более длинных волн. Положение красной-инфракрасной границы поглощения рассчитывается по значениям отражательной способности соответственно в красном и ближних инфракрасных спектральных каналах спутниковых изображений при помощи зональных отношений или вегетационных индексов [Виноградов, 1994]. Такие признаки для данного класса земной поверхности инвариантны по отношению к широкому кругу факторов окружающей среды. В настоящее время предложен большой набор различного рода зональных отношений или вегетационных индексов (NDVI, SWVI, EVI и др.).

Цель настоящей работы – оценка степени и пространственно-временного распределения повреждения растительности в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района на основе использования данных спутниковой съемки и материалов наземных измерений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Формирование банка данных ГИС. Для территории Норильского промышленного района сформирован компьютерный банк данных ГИС, который содержит цифровые картографические и атрибутивные данные тематических общегеографических и экспертных карт, дистанционного зондирования и наземных обследований. Используемые в работе спутниковые изображения SPOT VEGETATION и ENVISAT MERIS получены из архива Института космических исследований СО РАН по проекту “FEMINE” (Forest Ecosystem Monitoring in Northern Eurasia, ESA-IAF, 2004).

База данных наземных измерений содержит сведения, полученные в ходе полевых исследований (2001, 2003 и 2004 гг.) на ключевых участках, расположенных на территории Норильского промышленного района. База создана в формате программы Microsoft Access и состоит из файлов, в которые занесены данные описаний маршрутных точек и пробных площадей, имеющих географическую привязку к цифровой топооснове.

Программные средства, используемые при формировании данных ГИС, включают пакеты ArcGIS 9, ArcView 3.2; программы-векторизаторы (MapEdit 3.0, EasyTrace 7); пакеты обработки растровых изображений (ERDAS IMAGINE 8.5, BEAM 3.0); СУБД (DBASE III/IV, Microsoft Access), а также дополнительные процедуры собственной разработки.

Графическая информация в банке данных ГИС представлена в формате векторных шейп-файлов (ESRI *.shp), растровых грид-тем (ESRI Spatial Analyst grid) или многослойных (многоканальных) дистанционных изображений (ERDAS IMAGINE *.img). Описательная (атрибутивная) информация для картографических объектов организована в виде иерархически связанных таблиц (в формате DBASE – *.dbf и MS Access – *.mdb).

Оценка степени нарушенности растительного покрова с использованием мультиспектральных спутниковых данных ENVISAT MERIS. Спектрометр среднего разрешения MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), установленный на борту полярно-орбитального спутника ENVISAT, является программируемым спектрометром для формирования цифровых изображений земной поверхности [Curran, Steele, 2004].

В работе использовались изображения MERIS FR (Full Resolution Geophysical Product) с разрешением 300 × 300 м в проекции пикселя (в надире). Изображения прошли стандартную геометрическую и радиометрическую коррекцию в соответствии со спецификацией “Level 2 Products” [<http://envisat.esa.int/instruments/meris/data-app/dataproduct.html>]. Данные в спектральных каналах изображений представлены в форме нормированной относительной отражательной способности.

Выбор изображений осуществлялся для периода максимальной вегетации (июнь – август) в районе исследований с учетом минимального содержания облаков и дымки. Таким образом, на территорию Норильского промышленного района отобрали пять изображений (сцен) MERIS с датами съемки: 24.07.2004, 25.07.2004, 28.07.2004, 29.07.2004, 30.07.2004.

С целью совмещения спутниковых изображений с топоосновой, а также для дальнейшего сопряженного анализа информации в ГИС, отобранные сцены MERIS трансформировались в картографическую проекцию UTM (Universal Transposed Mercator) для зоны 46 (центральный меридиан – 93° в. д.).

Для визуального анализа сцен на основе значений отражательной способности базовых спектральных каналов (reflec_1-reflec_7) видимого диапазона сформированы композитные изображения RGB:

$$R = \log(0,05 + 0,35 \cdot \text{reflec_2} + 0,6 \cdot \text{reflec_5} + \text{reflec_6} + 0,13 \cdot \text{reflec_7})$$

$$G = \log(0,05 + 0,21 \cdot \text{reflec_3} + 0,5 \cdot \text{reflec_4} + \text{reflec_5} + 0,38 \cdot \text{reflec_6})$$

$$B = \log(0,05 + 0,21 \cdot \text{reflec_1} + 1,75 \cdot \text{reflec_2} + 0,47 \cdot \text{reflec_3} + 0,16 \cdot \text{reflec_4})$$

Для контрастирования изображений использовался метод выравнивания яркостных гистограмм.

Полученные RGB-композиции с достаточно широким охватом в коротковолновой (синей) области спектра позволили оценить длину и характер распространения видимого дымового шлейфа. За проанализированный период съемки (с 24 по 30 июля 2004 г.) его направление меняется в створе угла, близкого к 180° , в южном направлении от г. Норильска. В широких диапазонах меняются также степень рассеяния и однородность шлейфа. Длина видимого шлейфа на изображениях достигает 300 км от г. Норильска и охватывает площадь порядка 2 млн га.

Оценка состояния растительности выполнялась с использованием хлорофилльного индекса MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) [Jadunandan, 2004]:

$$MTCI = \frac{R_{Band10} - R_{Band9}}{R_{Band9} - R_{Band8}}, \quad (1)$$

где R_{Band10} , R_{Band9} , R_{Band8} – значения относительной отражательной способности в 10, 9 и 8 спектральных каналах MERIS с центрами в 753,75 нм, 708,75 и 681,25 нм соответственно.

Индекс MTCI чувствителен к содержанию хлорофилла в фотосинтетически активном слое зеленых растений. Величина индекса характеризует положение так называемой красной границы поглощения солнечной радиации (REP – red-edge position) [Clevers et al., 2004], практически линейно связана с концентрацией хлорофилла в пологе растительности.

Индекс MTCI рассчитан попиксельно для всех пяти исходных изображений MERIS. Для уменьшения влияния атмосферных помех (дымка, облака, тени) результирующее значение индекса MTCI для каждого пикселя (i) изображения было получено как максимум всех пяти изображений:

$$MTCI^i = \max(MTCI_1^i, MTCI_2^i, \dots, MTCI_5^i).$$

Ранжирование территории по величине хлорофилльного индекса может являться основой для зонирования территории по состоянию растительности. Низкие значения MTCI и, следовательно, низкая концентрация хлорофилла соответствуют наиболее нарушенной территории вблизи г. Норильска и по долине р. Рыбная. Однако следует учи-

тывать, что снижение содержания хлорофилла обуславливается и естественными географическими факторами, например, в горных ландшафтах на северо-востоке от г. Норильска.

Оценка временной динамики наземных экосистем с использованием разновременных спутниковых данных SPOT Vegetation.

С целью выявления временных трендов состояния растительности привлекались данные спутниковой съемки SPOT Vegetation за период 1998–2004 гг.

Камера Vegetation, установленная на французском спутнике SPOT, регистрирует данные среднего пространственного разрешения в спектре видимых и близких инфракрасных волн, которые могут быть использованы для мониторинга состояния растительного покрова на глобальном уровне [Townshend, 1994].

Данные SPOT Vegetation использовались в виде изображений, полученных как десятидневные композиции по критерию максимума вегетационного индекса NDVI [Виноградов, 1994]. Индекс рассчитывался как нормализованное разностное отношение по красному (канал 2) и ближнему инфракрасному (канал 3) спектральным каналам. Для дальнейшего анализа отбирались подекадные композиции, перекрывающие период вегетации с 1 июня по 1 октября. Таким образом, на каждый год (с 1998 по 2004 г.) использовалось 13 подекадных изображений NDVI. Длина всего временного ряда составляла 185 декад (по всем декадам семи лет), из которых расчет велся по 91 (13 декад \times 7 лет). Пространственное распределение тренда NDVI (рис. 1) вычислялось попиксельно по стеку из 91 изображения NDVI, упорядоченных по датам декад. Изменение NDVI в % относительно первой декады временного ряда для каждого пикселя выходного изображения вычислялось в форме линейного тренда.

Снижение NDVI и, следовательно, содержания хлорофилла фиксируется в области, удаленной от г. Норильска на 15–30 км, вытянутой в юго-западном направлении. В этом районе (черный прямоугольник на рис. 1) фиксируется снижение среднего значения NDVI (см. рис. 1, 2, 3) на протяжении семи лет (1998–2004 гг.). В 2004 г. наблюдается уве-

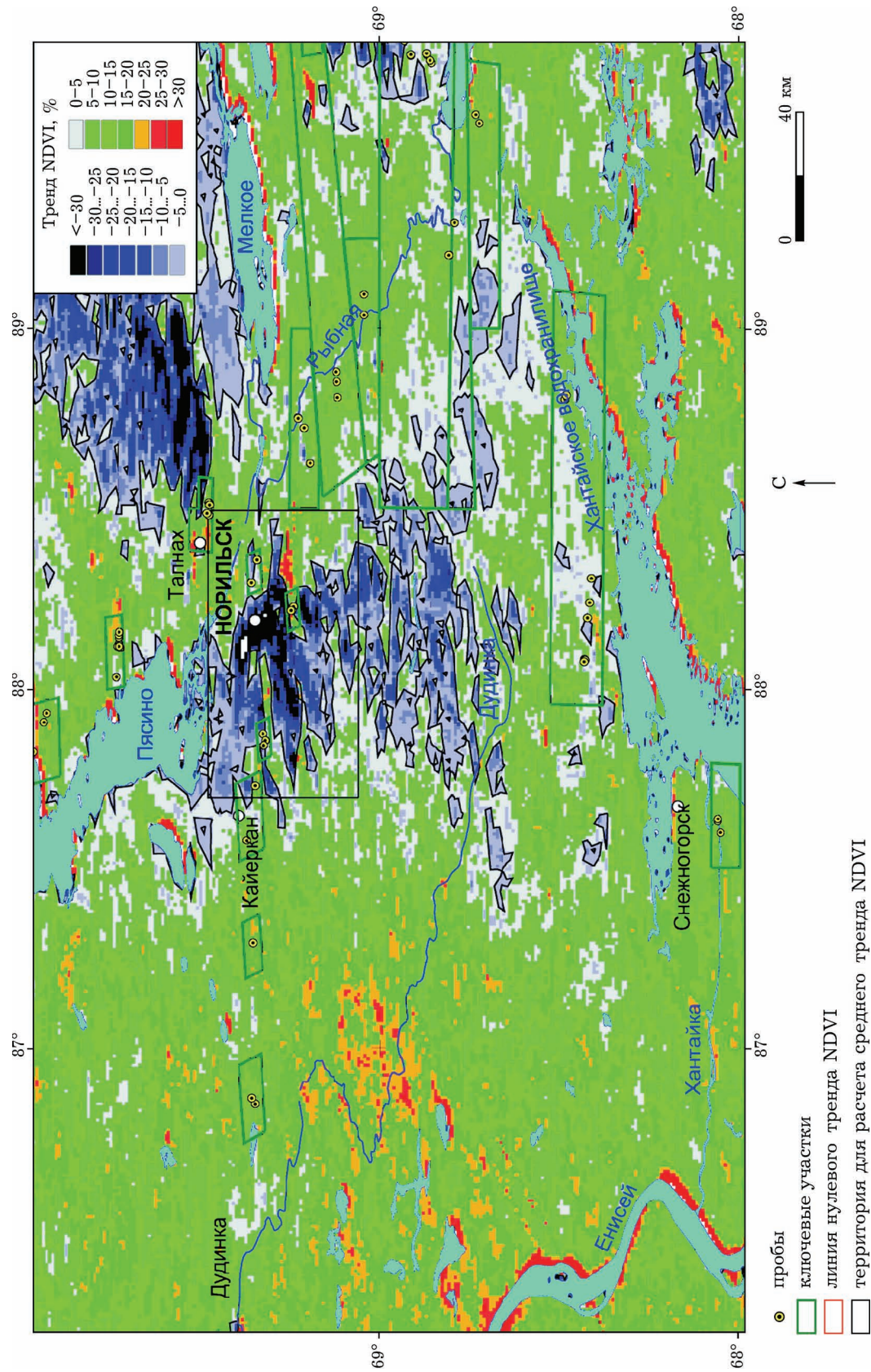


Рис. 1. Распределение тренда NDVI сезона вегетации (июнь – сентябрь) за период 1998–2004 гг.

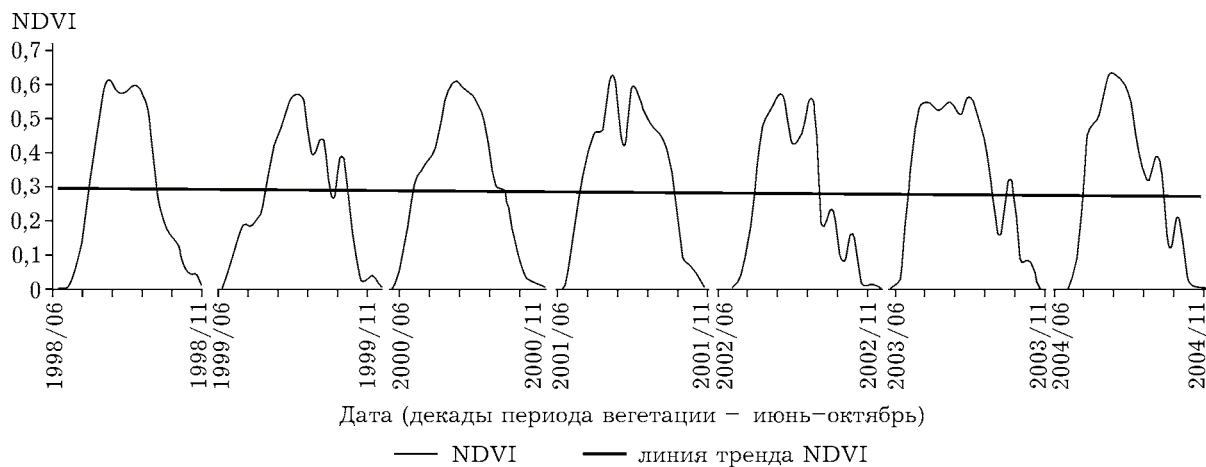


Рис. 2. Кривые средних значений NDVI (сезонов вегетации) и его линейный тренд за период 1998 – 2004 гг. на территории до 30 км от г. Норильска

личение максимума кривой NDVI, возможно, обусловленное погодными условиями в этом году, так как на остальной (удаленной от г. Норильска) территории наблюдается аналогичное поднятие максимума кривой среднего NDVI.

Области снижения вегетационного индекса NDVI (отрицательный тренд) за последние семь лет, совместно с распределением хлорофилльного индекса МТСИ (по данным MERIS, 2004 г.) (см. рис. 3), являются пространственной основой для зонирования территории по степени нарушенности растительного покрова.

Оценка и картографирование состояния растительного покрова на основе пространственного анализа в ГИС. За период 2001–2004 гг. выполнены работы по инвентаризации текущего состояния растительного покрова в зоне техногенного воздействия [Отчет о НИР..., 2005]. Комплексные исследования лесной и тундровой растительности с отбором образцов растений-индикаторов и почв на содержание серы и тяжелых металлов проведены на 26 ключевых участках, расположенных на расстоянии от 3 до 246 км от г. Норильска в разных направлениях (северном, северо-восточном, восточном, юго-восточном, южном и западном).

Проведена систематизация природно-территориальных комплексов и условий местобитания растительности, являющаяся важным этапом при решении задач комплексной оценки состояния наземных экосистем. Такой

подход обеспечивает возможность охватить исследованиями все их природное разнообразие и экстраполировать данные, полученные на ключевых участках, на всю территорию в пределах ландшафтных аналогов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработаны качественные и количественные критерии, по которым последовательно осуществлялась оценка состояния растительного покрова исследуемой территории.

На первом этапе проведена качественная оценка функционального состояния растительного покрова на основе анализа фитоценологических параметров сообществ, диагностирующих техногенные деструкции на примере растительных сообществ разных типов (лесотундрового, тундрового, болотного) в равнинных и горных ландшафтах в зависимости от удаленности от источника техногенного воздействия. В качестве критериев выбраны 15 пунктов, характеризующих состояние компонентов всех ярусов сообщества (древесного, кустарникового, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового). По результатам сравнительно-географического анализа предложены условные баллы, отражающие степень нарушенности растительного покрова: 1 – ненарушенные сообщества (природный фон); 2 – слабо нарушенные; 3 – умеренно нарушенные; 4 – сильно нарушенные; 5 – очень сильно (тотально) нарушенные.

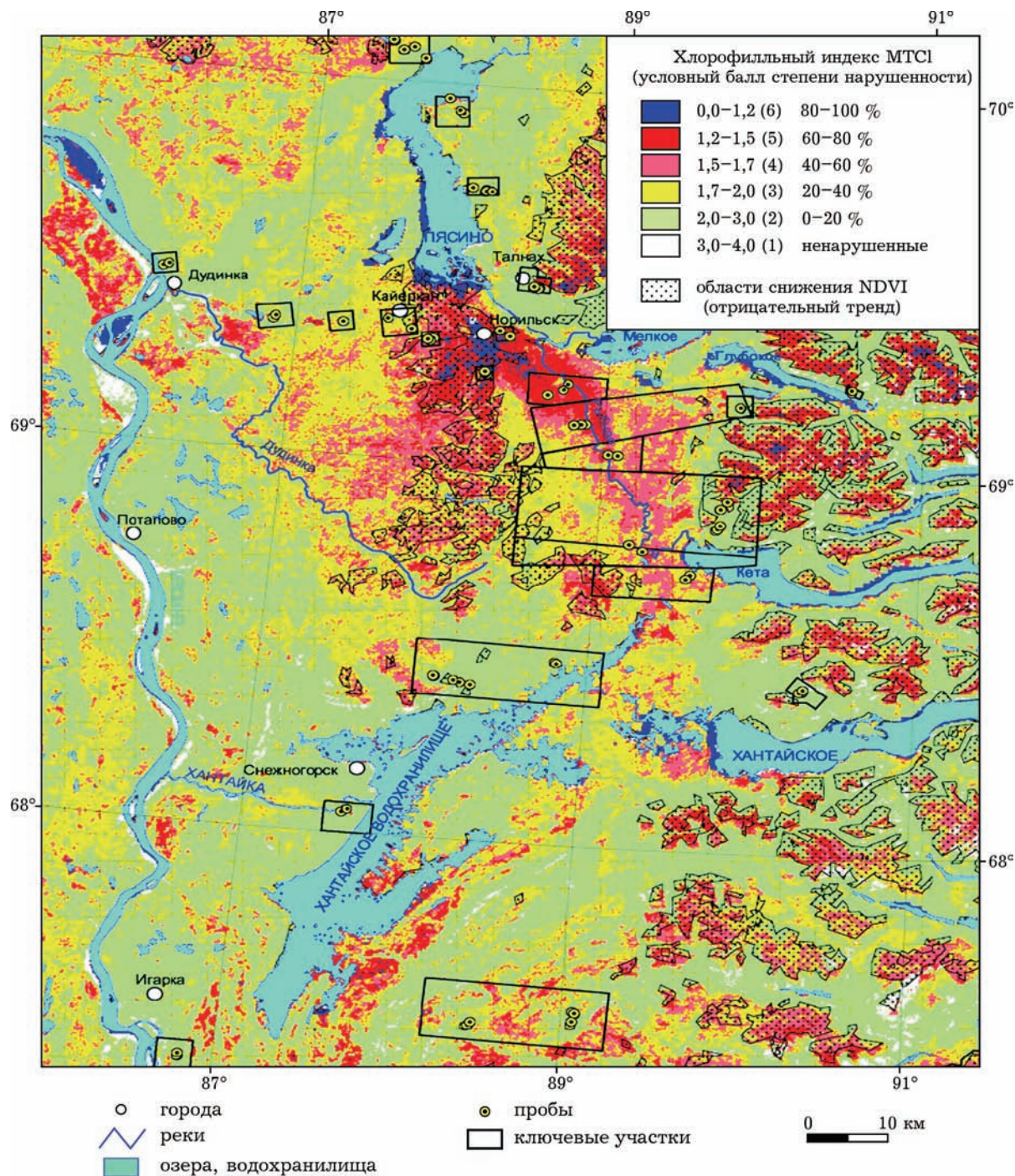


Рис. 3. Карта хлорофилльного индекса МТСІ (по данным спутника ENVISAT MERIS, 2004 г.) и области снижения (отрицательного тренда) вегетационного индекса NDVI (по данным спутника SPOT Vegetation за период 1998–2004 гг.)

Количественные критерии оценки состояния растительного покрова разработаны на основе результатов химических анализов по содержанию серы и тяжелых металлов в растительных и почвенных образцах, а также в

образцах снега. Для получения общей картины нарушенности растительного покрова исследуемой территории материалы следовало привести в сравнимую форму. Поэтому для анализа использовалось не абсолютное зна-

чение содержания элемента, а его превышение (в указанное число раз) по сравнению с фоновым значением, т. е. кратность превышения фонового содержания элемента.

За фоновые значения содержания элементов в разных видах растений-индикаторов приняты показатели, полученные на самых удаленных от г. Норильска ключевых участках – “Авам”, “Эндэ”, “Кугарамакан”, “Сухариха”, “Черная”. Некоторые значения, например содержание серы в мхах и лишайниках, меди и никеля в лесной подстилке, оказались аномально высокие и были исключены из рассмотрения на данном этапе.

Для сравнительной оценки состояния растительного покрова на разных ключевых участках составлены две группы таблиц. В таблицах первой группы представлены фактические значения содержания химических элементов в образцах растений разных ярусов растительных сообществ и кратность превышения фонового содержания элемента для данного вида растений или компонента сообщества. В качестве индикаторных рассматривались следующие характеристики: показатели загрязнения тяжелыми металлами и серой хвои лиственницы (*Larix gmelinii*) и ели (*Picea obovata*), листьев кустарников (ивы мохнатой (*Salix lanata*), ивы сизой (*Salix glauca*), березы карликовой (*Betula nana*), мхов и лишайников на суходолах и болотных комплексах. Часть ключевых участков охарактеризована данными по содержанию серы, меди и никеля в снежном покрове. Эта дополнительная информация является очень важной для комплексной оценки состояния растительного покрова.

Вторая группа таблиц характеризует показатели превышения фоновых значений содержания серы, меди и никеля в растительных и почвенных образцах и диапазоны их варьирования. Анализ по каждому элементу позволил выделить группы ключевых участков с разным уровнем загрязнения: две контрастные группы – природный фон и очень сильно загрязненные, и три переходные – сильно-, умеренно- и слабозагрязненные, всего пять градаций в соответствии с условными баллами по степени нарушенности растительного покрова. Каждому участку также присвоен соответствующий услов-

ный балл уровня загрязнения снежного покрова.

Таким образом, мы получили показатели загрязнения разных компонентов природных систем, представленных в сводных таблицах в сравнимом виде, которые могут быть подвергнуты автоматизированной обработке и комплексному многомерному анализу.

На следующем этапе проведена пространственная экстраполяция точечных данных. Используя возможности пакета ArcView GIS 3.2 (с модулями Spatial Analyst и 3D Analyst), по изолиниям рельефа сформированы векторная (триангуляционная – TIN) и растровая (интерполяционная) модели рельефа, включающие слои абсолютной высоты местности над уровнем моря (м) и крутизны поверхности (угол уклона, град.). Размеры пикселя полученной цифровой модели рельефа (ЦМР) составляли 100×100 м.

Для пространственной экстраполяции данных по превышениям фоновых значений содержания тяжелых металлов и серы использован аппарат множественной линейной регрессии. При этом показатели превышения выступали зависимыми переменными регрессионных уравнений, а состав независимых переменных формировался из набора следующих характеристик: $\log(d)$ – десятичный логарифм расстояния от г. Норильска (м); $\log(h)$ – десятичный логарифм абсолютной высоты над уровнем моря (м); s – угол наклона поверхности (крутизна, град.); $\sin(a)$ и $\cos(a)$ – синус и косинус экспозиции склона a (град.) относительно северного направления; $\sin(b)$ и $\cos(b)$ – синус и косинус угла b (град.) между направлением от г. Норильска и направлением на север; $\sin(b - a + 180)$ и $\cos(b - a + 180)$ – синус и косинус экспозиции склона относительно направления на г. Норильск.

Каждый из вышеперечисленных показателей рассчитывался в форме растрового слоя на всю территорию района исследований. Размер пикселей полученных растров составлял 100×100 м.

Величины h , s и a рассчитывались на основе ЦМР. Логарифмическая шкала дает более точную аппроксимацию, поэтому в моделях использовались логарифмы расстояния d и высоты h (рис. 4). Само расстояние d вы-

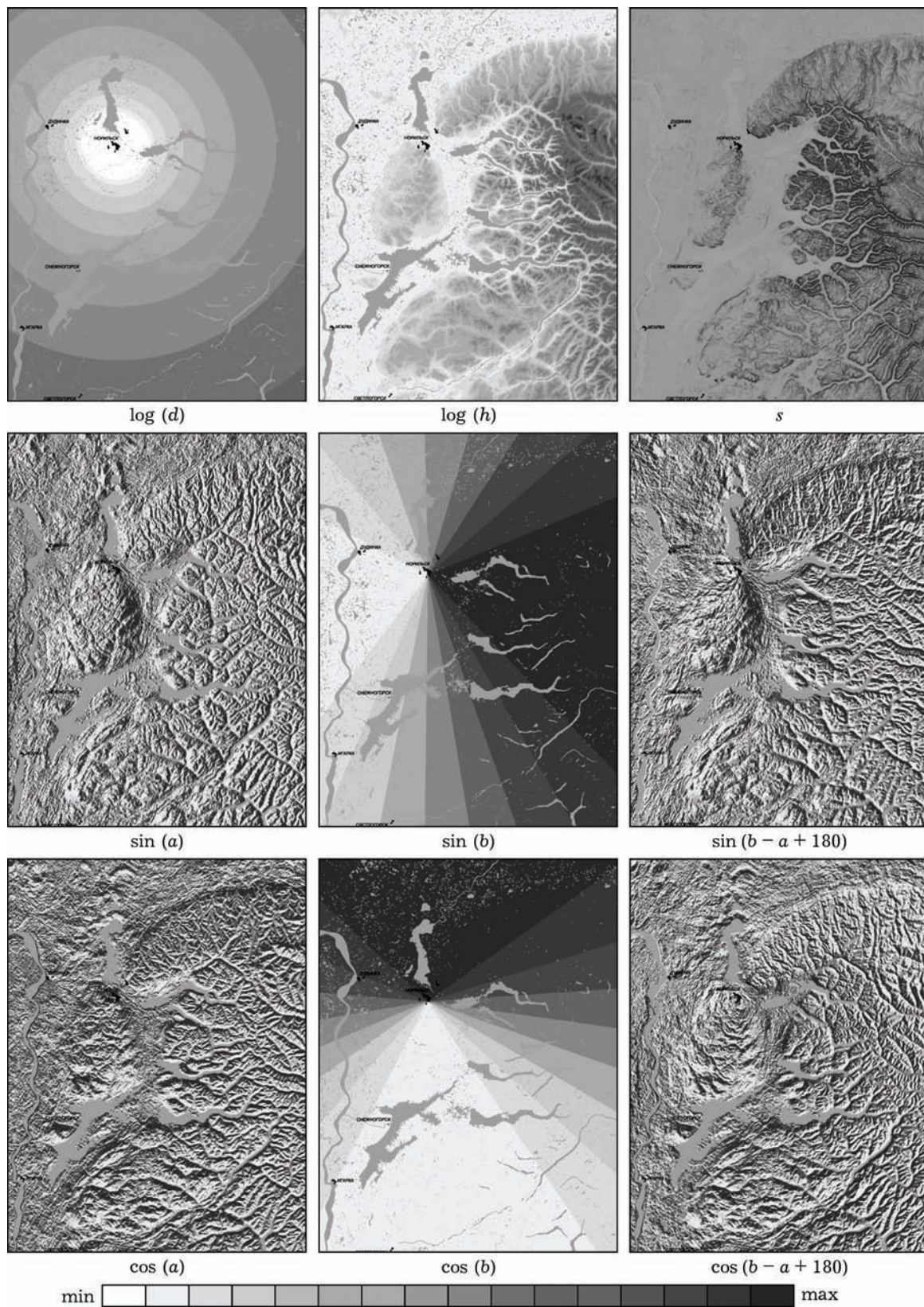


Рис. 4. Изображения растровых слоев входных (независимых) переменных регрессионных моделей аппроксимации превышений фоновых значений содержания тяжелых металлов и серы в компонентах наземных экосистем

числялось для каждого пикселя от его центра до границы территории г. Норильска, взятой с топоосновы масштаба 1 : 1 000 000.

Розу ветров или, другими словами, преобладающее направление ветропереноса от источника характеризует угол (b), который откладывается между направлением на север и направлением от источника загрязнения (г. Норильск) до заданной точки (или пикселя изображения). Высота (h), крутизна (s) и экспозиция (a) поверхностей склонов играют важную роль в моделях распространения поллютантов, так как позволяют косвенно учесть влияние орографических факторов на ветроперенос вещества.

“Солнечная” экспозиция (a) склонов отклоняется от направления на север, хотя в нашем случае более логично ввести угол “ветровой” экспозиции склонов ($b - a + 180$), отмеряемый от направления на источник загрязнения. Использовать углы a , b и ($b - a + 180$) непосредственно как переменные в линейных регрессионных моделях не совсем правильно, так как величина угла скачкообразно меняется при достижении максимума в 360° , что противоречит непрерывному характеру распределений оцениваемых величин. Поэтому в моделях были использованы не сами углы, а их тригонометрические функции: \cos и \sin . При этом \cos характеризует направление север – юг (> 0 – северное, < 0 – южное), а \sin – направление запад – восток (> 0 – восточное, < 0 – западное) (см. рис. 4).

Зачастую, особенно когда количество наблюдений ограничено, использование большого числа независимых переменных снижает количество остаточных степеней свободы, что, в свою очередь, уменьшает качество регрессионных моделей. Чтобы использовать максимум информации, содержащейся во всех независимых переменных, и не снижать количество остаточных степеней свободы, нами применен метод максимального модифицированного R^2 (R_{adj}^2) [Montgomery, Peck, 1997]. Если обозначить через X_m – множество, состоящее из m независимых переменных, а M – множество, состоящее из всех возможных подмножеств $x_i^{k_i}$, где k_i – количество различных независимых переменных ($k_i = 1, \dots, m$), принадлежащих X_m , то по методу максимального модифицированного R^2 из всех на-

боров независимых переменных $x_i^{k_i} \in M$, выбирается та регрессионная модель i , для которой R_{adj}^2 принимает максимальное значение.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(n-1)(1-R^2)}{n-c}, \quad (2)$$

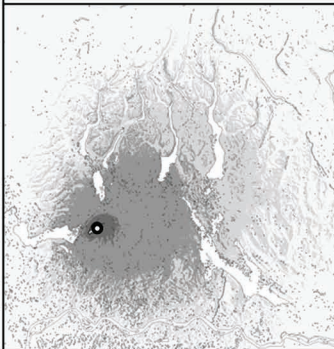
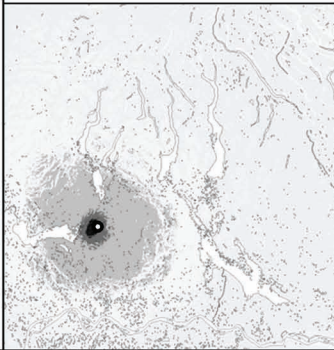
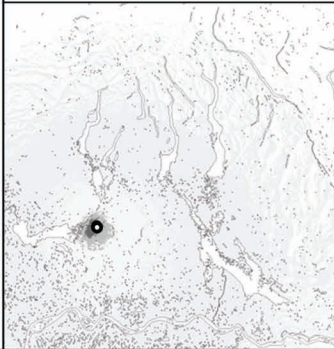
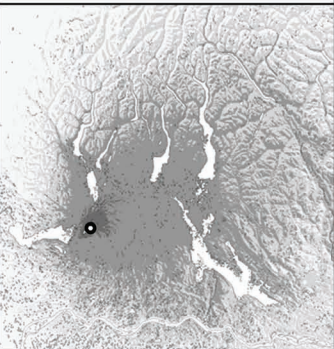
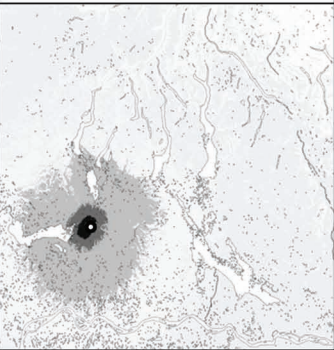
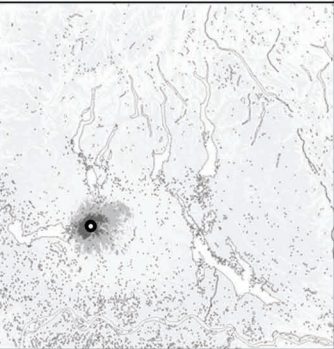
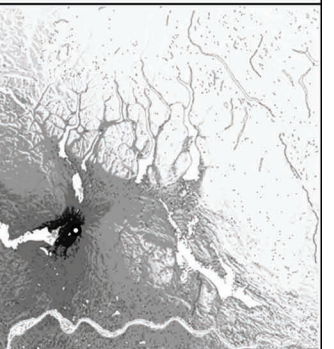
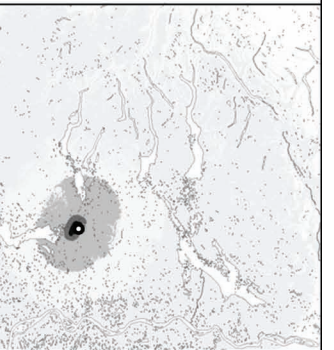

где n – количество наблюдений, c – количество членов в составе модели, составленной из ($k = c - 1$) независимых переменных; R^2 – коэффициент детерминации модели.

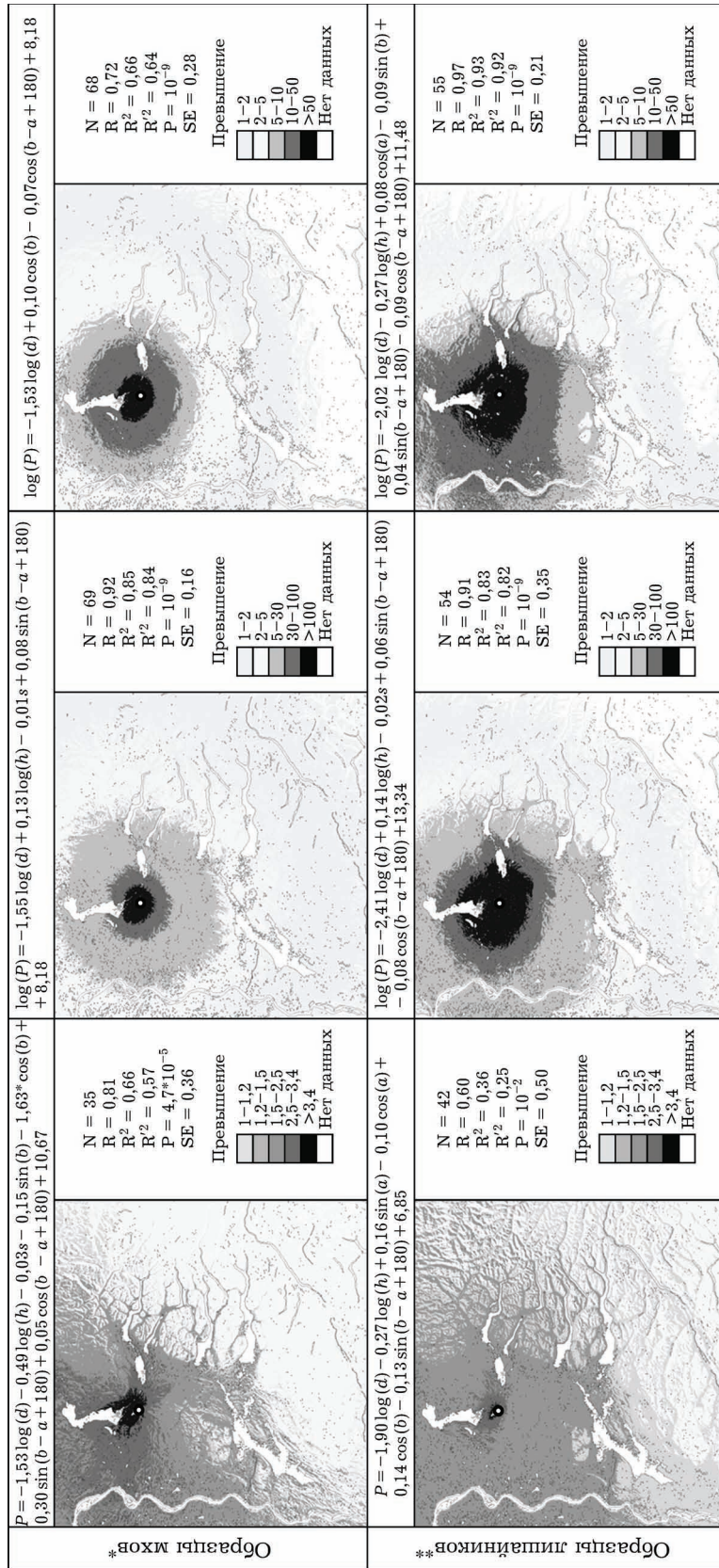
Следует отметить, что R^2 всегда растет при вводе дополнительной переменной в модель, следовательно, он не подходит в качестве критерия выбора оптимального состава переменных в модели. Значение R_{adj}^2 может также увеличиваться при вводе дополнительной переменной в модель, но снижение остаточных степеней свободы ($n - c$) при добавлении менее информативной переменной приводит к уменьшению R_{adj}^2 . Следовательно, выбор максимального R_{adj}^2 является компромиссом между высоким уровнем детерминации модели и количеством остаточных степеней свободы.

Выборки данных для построения регрессионных моделей формировались по таблицам превышений фоновых значений. При этом для каждой пробы с известным значением зависимой переменной определялся вектор входных переменных путем наложения на растровые слои входных переменных (см. рис. 4).

На рис. 5 приведены полученные множественные линейные регрессионные модели аппроксимации превышений фоновых значений содержания серы, никеля и меди в образцах хвои лиственницы, хвои ели, мха, лишайниках и листьях березы карликовой. В состав независимых переменных моделей включены только статистически значимые показатели (для уровня значимости 0,05).

В моделях аппроксимации превышений серы использовалось значение самого показателя превышения, а в моделях для никеля и меди – десятичный логарифм превышения. Модели далее использовались для пространственной экстраполяции величины превышений содержания серы, никеля и меди на территорию района исследований. Превышение (P) рассчитывалось для каждого пикселя ра-

	S	Ni	Cu
Хвоя лиственничной	$P = -1,30 \log(d) + 0,02s - 0,06 \sin(a) - 0,10 \cos(a) - 0,37 \cos(b) + 0,10 \sin(b - a + 180) + 7,76$  <p> N = 55 R = 0,87 R² = 0,76 R² = 0,73 P = 10⁻⁶ SE = 0,23 Превышение 1-1,2 1,2-1,5 1,5-2,5 2,5-3,4 >3,4 Нет данных </p>	$\log(P) = -1,02 \log(d) + 0,18 \log(h) - 0,02s - 0,11 \cos(b - a + 180) + 5,30$  <p> N = 65 R = 0,88 R² = 0,77 R² = 0,75 P = 10⁻⁹ SE = 0,22 Превышение 1-2 2-5 5-30 30-100 >100 Нет данных </p>	$\log(P) = -0,60 \log(d) - 0,05 \sin(b) - 0,05 \cos(b) - 0,03 \sin(b - a + 180) - 0,08 \cos(b - a + 180) + 3,18$  <p> N = 66 R = 0,73 R² = 0,53 R² = 0,49 P = 10⁻⁹ SE = 0,22 Превышение 1-2 2-5 5-10 10-50 >50 Нет данных </p>
Хвоя ели	$P = -2,48 \log(d) - 0,84 \log(h) + 0,46 \sin(b) - 1,63 \cos(b) + 0,39(b - a + 180) + 14,95$  <p> N = 27 R = 0,94 R² = 0,89 R² = 0,86 P = 10⁻⁹ SE = 0,42 Превышение 1-1,2 1,2-1,5 1,5-2,5 2,5-3,4 >3,4 Нет данных </p>	$\log(P) = -1,15 \log(d) - 0,02s - 0,07 \sin(b - a + 180) + 6,38$  <p> N = 49 R = 0,89 R² = 0,79 R² = 0,78 P = 10⁻⁹ SE = 0,27 Превышение 1-2 2-5 5-30 30-100 >100 Нет данных </p>	$\log(P) = -0,73 \log(d) - 0,14 \log(h) - 0,03s - 0,11 \cos(b) + 0,08 \sin(b - a + 180) + 3,63$  <p> N = 49 R = 0,88 R² = 0,77 R² = 0,75 P = 10⁻⁹ SE = 0,17 Превышение 1-2 2-5 5-10 10-50 >50 Нет данных </p>
Листья березы карликовой	$P = -1,04 \log(d) - 0,13 \log(h) - 0,01s + 0,24 \sin(b) - 0,34 \cos(b) - 0,16 \sin(b - a + 180) + 0,10 \cos(b - a + 180) + 6,94$  <p> N = 65 R = 0,69 R² = 0,47 R² = 0,41 P = 3*10⁻⁶ SE = 0,55 Превышение 1-1,2 1,2-1,5 1,5-2,5 2,5-3,4 >3,4 Нет данных </p>	$\log(P) = -0,99 \log(d) - 0,02s + 0,06 \sin(b) - 0,05 \cos(b) + 5,36$  <p> N = 86 R = 0,91 R² = 0,83 R² = 0,82 P = 10⁻⁹ SE = 0,16 Превышение 1-2 2-5 5-30 30-100 >100 Нет данных </p>	$\log(P) = -0,56 \log(d) + 0,17 \log(h) - 0,02s + 0,07 \sin(b) - 0,07 \cos(b) + 2,70$  <p> N = 88 R = 0,72 R² = 0,51 R² = 0,48 P = 10⁻⁹ SE = 0,19 Превышение 1-2 2-5 5-10 10-50 >50 Нет данных </p>



• источник загрязнения (г. Норильск)

Рис. 5. Регрессионные модели аппроксимации превышений фоновых значений содержания серы, никеля и меди в растительных образцах
 Характеристики модели: N – число измерений, R – коэффициент корреляции, R² – коэффициент детерминации, R² – модифицированный R², p – уровень статистической независимости, SE – стандартная ошибка. * – мхи *Hypogizium splendens*, *Pleurozium schreberi*, ** – лишайники рода *Cladonia*

стрового слоя как функция от растровых слоев независимых переменных модели. Результат представлен в виде растровых карт превышений (см. рис. 5).

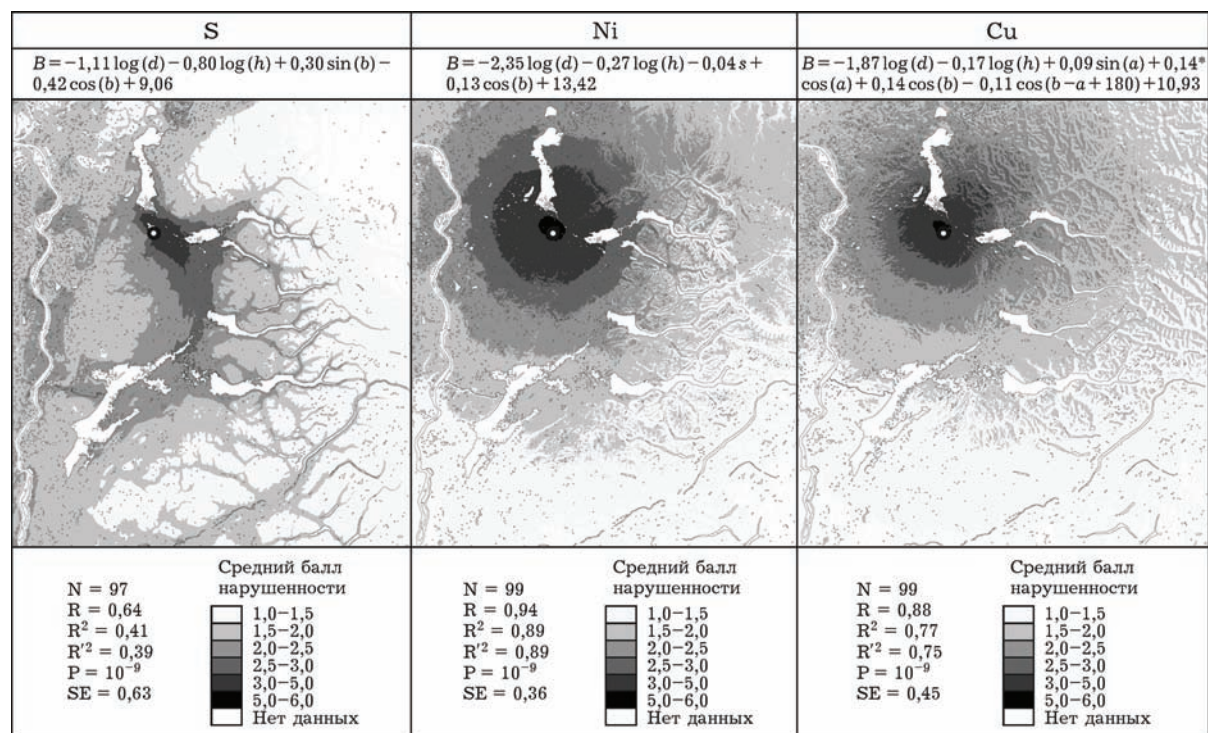
В регрессионных моделях аппроксимации превышения содержания серы в отличие от моделей по тяжелым металлам, ярко выражено влияние переменных рельефа (абсолютной высоты, экспозиции) и направления от г. Норильска. Особенно хорошо это видно в модели по образцам хвои ели. В моделях распространения тяжелых металлов в основном работает переменная расстояния от источника загрязнения с ярко выраженным логарифмическим характером распределения значений превышения: очень высокие значения вблизи и резкий спад при удалении.

Во всех моделях (как для серы, так и для тяжелых металлов) у древесных растений (лиственница, ель) и кустарников (береза карликовая) ярко выражено южное и юго-восточное направление смещения максимумов превышения, что совпадает с направле-

нием летней розы ветров; в моделях для мхов и лишайников преобладает северное направление области распространения максимальных значений. Для объяснения этой тенденции необходимо привлечение данных об особенностях атмосферных циркуляций и состоянии воздушного бассейна региона.

Следует также учитывать, что количество точек аппроксимации в различных моделях неодинаково, что затрудняет адекватное сравнение точности результатов экстраполяции. Для тех территорий, где количество точек наблюдений мало, достоверность экстраполяции снижается, т. е. проявляется определенный “краевой эффект”.

Для анализируемых элементов по диапазонам варьирования показателей превышений фоновых значений выделены пять уровней загрязнения территории. Каждому участку присвоены соответствующие условные баллы уровня загрязнения по сере, меди и никелю, установленные на основании данных химических анализов растительных и почвенных об-



● источник загрязнения (г. Норильск)

Рис. 6. Регрессионные модели аппроксимации значений условного балла уровня загрязнения территории тяжелыми металлами и серой.

Характеристики модели: N – число измерений, R – коэффициент корреляции, R² – коэффициент детерминации, R'² – модифицированный R², p – уровень статистической независимости, SE – стандартная ошибка

разцов, а также образцов снега. Условные баллы степени нарушенности растительного покрова на ключевых участках установлены по результатам их наземных обследований. По сводным данным построены множественные линейные регрессионные модели аппроксимации значений условного балла уровня загрязнения территории тяжелыми металлами и серой (рис. 6). Шестая градация в легенде карт со средним баллом нарушенности 5–6 на рис. 6 соответствует селитебной зоне, т. е. лишенной естественной растительности.

Карты расчетных зон загрязнения по меди и никелю отражают те же закономерности, что и карты превышений фоновых значений содержания элементов в образцах разных видов растений. Отличия выявляются только в ширине зон разной степени загрязнения, что может быть объяснено разной устойчивостью видов, их физиологическими особенностями и другими причинами.

Наиболее интересна модель, отражающая зоны загрязнения серой (см. рис. 6). Выделились зоны очень сильной (средний балл 3–5) и сильной (средний балл 2,5–3) нарушенности растительного покрова, которые безошибочно идентифицируются как при визуальном обследовании территории с вертолета, так и на космическом снимке. С этой точки зрения ситуация, отраженная здесь, очень близка к фактической. Можно предполагать, что сера является главным фактором, влияющим на состояние растительности и обуславливающим ее гибель в зоне наиболее сильного загрязнения.

С другой стороны, вызывает сомнение выделение вдоль р. Енисей зоны умеренной нарушенности (средний балл 2–2,5). Данных наземных наблюдений здесь нет, поэтому нельзя сказать ничего определенного про эту территорию, хотя, судя по космическим снимкам, дымовой шлейф распространяется в этом направлении на расстояние до 300 км.

Карты, составленные автоматизированным способом, безусловно, имеют ряд погрешностей, но играют важную роль для экстраполяции точечных наземных данных при оценке территории по степени нарушенности растительного покрова.

На заключительном этапе с использованием всех перечисленных материалов экспертным путем выполнено зонирование территории по степени нарушенности растительного покрова (рис. 7). В качестве основы использована карта хлорофилльного индекса МТСІ (см. рис. 3). Низкие значения МТСІ соответствуют наиболее нарушенной территории вблизи г. Норильска и по долине р. Рыбная. Невысокая концентрация хлорофилла, а главное, уменьшение его содержания (отрицательный тренд) может быть косвенным показателем ухудшения состояния растительного покрова. Полная гибель древесного и кустарникового ярусов или снижение их сомкнутости, дигрессивное оголение грунтов и уменьшение проективного покрытия травяно-кустарничкового яруса наблюдается повсеместно в зонах 4 и 5 на рис. 7.

Однако следует учитывать, что в горных ландшафтах снижение содержания хлорофилла обуславливается и естественными факторами, что мы и наблюдаем на северо-востоке в горных территориях. Такой же эффект могут давать гари. Поэтому для выделения зон мы использовали в комплексе все имеющиеся материалы, в том числе топографические карты 1950–1960-х гг., на которых отражены природные ландшафты, еще не подверженные техногенному воздействию.

Определенные трудности вызвало выделение зон 3 (умеренно нарушенных сообществ) и 2 (слабо нарушенных). Здесь нет визуальных признаков повреждения растительности, степень нарушенности определяется по результатам химических анализов накопления растениями тяжелых металлов и серы, а также по фитоценотическим параметрам, диагностирующим дигрессивные изменения сообществ.

Площади зон разной степени нарушенности растительного покрова представлены в таблице. Общая площадь территории с разной степенью нарушенности растительного покрова составляет 2400 тыс. га, из них на очень сильно (тотально) нарушенные сообщества, имеющие высшую степень деструкции (зона 5), и сильно нарушенные (зона 4) приходится 240 тыс. га. Эта территория характеризуется погибшими лесами, в сильной степени деградированными тундрами и болот-

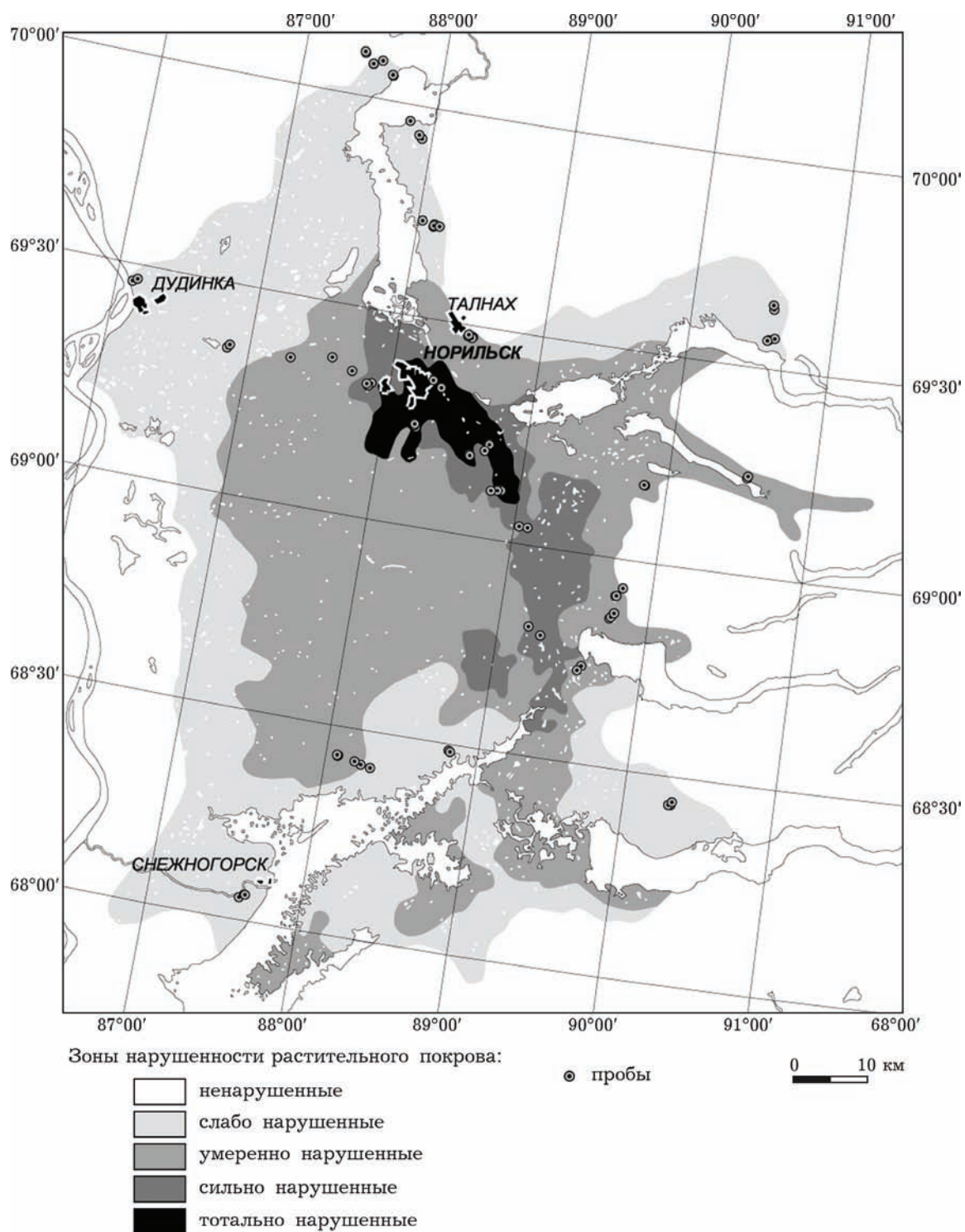


Рис. 7. Схема зонирования территории по степени нарушенности растительного покрова

ными комплексами. Значительная площадь – 1060 тыс. га – приходится на зону умеренно нарушенных сообществ (3). Здесь произрастает зональная естественная растительность,

в целом сохранившая свою исходную структуру, но в древесном ярусе около 50 % составляет сухостой, устойчивость таких сообществ очень низкая.

**Площади зон разной степени нарушенности
растительного покрова**

№ зоны	Степень нарушенности	Площадь, тыс. га
1	Ненарушенные (фоновые)	–
2	Слабо нарушенные	1100
3	Умеренно нарушенные	1060
4	Сильно нарушенные	170
5	Очень сильно (тотально) нарушенные	70
Всего нарушенных		2400

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие в литературе оценки площадей поврежденной растительности в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района противоречивы. Для сравнения, Б. И. Ковалев [1994] оценивает площадь поврежденных лесов по состоянию на 1991 г. в 903 тыс. га, из которых на ослабленные леса приходится 369 тыс. га, сильно ослабленные – 103 тыс. га, усыхающие – 36 и погибшие – 395 тыс. га. По данным, приведенным в отчете ФГУП “Востсиблеспроект” [1991], площадь поврежденных промвыбросами лесов составляет 859 тыс. га, из них погибших – 349 тыс. га.

По результатам автоматизированной обработки снимков NOAA с использованием вегетационного индекса [Государственный доклад..., 2004] на площади 2642 тыс. га зарегистрированы поврежденные насаждения, из них 632 тыс. га погибшие.

Таким образом, существующие оценки степени нарушенности растительного покрова в зоне промышленного воздействия неоднозначны. Это относится и к размерам площадей разной степени деградации растительности, и к оценке состояния в целом: оцениваются ли только лесные территории, или речь идет об общей площади растительного покрова.

Представленное зонирование выполнено на основе анализа состояния основных зональных компонентов растительного покрова данной территории (лесотундровых, тундровых, болотных экосистем) и в целом дает представление о степени нарушенности на-

земных экосистем в зоне техногенного воздействия. Тем не менее такое зонирование следует считать предварительным, так как оно базируется на данных по состоянию растительности. Сопряженный анализ имеющихся в ГИС данных позволил выявить зоны различной степени загрязнения территории тяжелыми металлами и серой по состоянию растительного покрова. В дальнейшем необходимо продолжить эти работы с привлечением данных по содержанию поллютантов в атмосфере, состоянию вод, почв и животного населения. Решение перечисленных задач имеет важное значение для разработки региональных научно обоснованных экологических нормативов предельно допустимых уровней выбросов вредных веществ предприятиями Норильского промышленного района в окружающую среду.

Коллектив авторов благодарит всех сотрудников ИЛ СО РАН, принимавших участие в полевых и камеральных работах, химическом анализе образцов, предоставивших данные в банк данных ГИС для выполнения представленной в статье работы. Анализ результатов работы выполнен при поддержке проекта 14.В25.31.0031 Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- Виноградов Б. В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1994. 320 с.
- Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2003 г.”. Главное управление природных ресурсов и охраны окружающей среды МПР России по Красноярскому краю. Красноярск, 2004. 218 с.
- Ковалев Б. И. Мониторинг состояния лесов в условиях аэротехногенного воздействия Норильского промышленного района // Лесное хозяйство. 1994. № 3. С. 42–45.
- Ландшафтная карта СССР. Масштаб 1 : 2 500 000. М., 1987.
- Отчет о научно-исследовательской работе “Комплексная оценка состояния и мониторинг природной среды с целью определения региональных экологических нормативов”. Договор № 225-04/Н от 18.05.2004 г. ИЛ СО РАН. Красноярск, 2005. 690 с.
- Отчет по обследованию состояния части лесов Таймырского лесничества Туруханского лесхоза Красноярского управления лесами и Государственного земельного запаса, подверженных воздействию промышленных выбросов Норильского горно-металлургического комбината. ФГУП “Востсиблеспроект”, 1991.

- Curran P. J. et al. Remote Sensing the Biochemical Composition of a Slash Pine Canopy // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1997. Vol. 35. P. 415–420.
- Curran P. J., Steele C. M., MERIS: The Re-branding of an Ocean Sensor // Int. Journ. of Remote Sensing (submitted). 2004.
- Jadunandan D. et al. MTCI: The MERIS Terrestrial Chlorophyll Index // ENVISAT Symp. Proc. Austria, Salzburg, 2004.
- Clevers J. G. P. W. et al. Derivation of the Red Edge Index using the MERIS Standard Band Setting // Int. Journ. of Remote Sensing. 2002. Vol. 23. P. 3169–3184.
- Townshend J. R. G. Global Data Sets for Land Applications from the Advanced Very High Resolution Radiometer: An Introduction // Ibid. 1994. Vol. 15, N 17. P. 3319–3332.
- Montgomery D. C., Peck E. A. Introduction to Linear Regression Analysis. Wiley, USA, 1997. P. 270–272.

GIS-Based Approaches to Assessment of the Terrestrial Ecosystems State in the Norilsk Industrial Area

M. A. KORETS, V. A. RYZHKOVA, I. V. DANILOVA

*V. N. Sukachev Institute of Forests of SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: mik@ksc.krasn.ru*

The study was based on the field data collected in the Norilsk industrial area (2001–2004) and remote sensing imagery (1998 – 2004). The vegetation degradation was assessed using multispectral satellite sensor ENVISAT MERIS. The terrestrial ecosystems dynamics was analyzed using SPOT VEGETATION satellite data recorded at different time periods. The regression models were developed for the Ni-, Cu- and S-containing pollutants allocated in the terrestrial ecosystems components. The vegetation degradation and pollution degree were also estimated using marking system. The area of study was also zoned by vegetation degradation degree.

Key words: geographic information systems (GIS), remote sensing (RS), multispectral satellite imagery, disturbance of terrestrial ecosystems, heavy metals and sulfur.